

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.12.017

城市低影响开发与水系联调系统治涝研究及应用

刘广奇¹, 孔彦鸿¹, 周广宇¹, 杨胜梅², 桂发二³

(1. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 3. 浙江贵仁信息科技股份有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要: 内涝频发成为城镇化过程中典型的“城市病”, 城市内涝需要从源头、管渠到河湖水系进行系统化治理。基于模型量化分析, 提出低影响开发和闸门、泵站等对城市内涝的控制措施及其优化方法, 通过内涝面积、积水深度、积水时间、溢流量等参数, 评价不同组合措施下的内涝程度, 并以长江流域典型城市的真实降雨情景, 评价低影响开发与水系联调不同方案下的治涝效果。

关键词: 低影响开发; 水系联调; 系统治涝

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)12-0107-06

Research and Application of Urban Low Impact Development and Water System Joint Commissioning for Systematic Waterlogging Control

LIU Guang-qi¹, KONG Yan-hong¹, ZHOU Guang-yu¹, YANG Sheng-mei², GUI Fa-er³

(1. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Zhejiang Guiren Information Technology Co. Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Frequent waterlogging has become a typical “urban disease” in the process of urbanization. Systematic treatment from the source, pipe canal to river and lake water system is necessary to solve urban waterlogging. The effect of low impact development, gates and pump stations on urban waterlogging control and the optimization methods were proposed based on the quantitative analysis of the model. The waterlogging degree under different measure combinations was evaluated from the waterlogging area, waterlogging depth, waterlogging time, overflow and other parameters. The waterlogging control effect under different schemes of low impact development and water system was also evaluated by joint commissioning based on the real rainfall scenario of typical cities in the Yangtze River basin.

Key words: low impact development; water system joint commissioning; systematic waterlogging control

20世纪末, 美国为应对城市雨洪内涝和径流污染等问题提出了低影响开发(LID)理念^[1-4], 旨在土地开发过程中, 利用场地内的空间和设施, 实现场地开发后对雨水径流等水文特征的影响最小。由

于低影响开发是在场地原有设施功能基础上增加了雨水管理的效果, 通常只能对10~25 mm的降水进行渗蓄滞留等控制, 对于大雨或暴雨情景, 则需要充分发挥排水管渠和内河水系的排水防涝

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001400)

功能^[5-7]。

为此,针对我国城市内涝频发的现状,开展了基于低影响开发、传统城市排水系统与河湖水系联合调控进行系统治涝的技术研究,并以长江流域典型城市的示范应用为例,分析基于源头、管网和河湖水系联合调度的城市内涝系统化治理技术方案。

1 方法研究

1.1 低影响开发与内涝的关系模型

为了研究低影响开发对城市洪涝的定性影响,在小流域尺度上采用美国农业部土壤保持局于 20 世纪 50 年代提出的小流域产流模型——SCS 产流模型,流域可能的最大径流蓄滞量与无因次参数 CN 有关,反映了降雨前流域特征的综合参数,与前期土壤湿润程度、坡度、植被、土壤类型和土地利用状况等相关^[8]。为此,在流域层面以城市土地利用中“草地”用地类型的面积比例增大 10 个百分点来表征低影响开发的面积,探索低影响开发与城市内涝之间的联系。土地利用类型主要有工矿用地、林地、草地、水域、城镇用地和道路,其中 $k_{\text{工矿}} + k_{\text{林地}} + k_{\text{草地}} + k_{\text{水域}} + k_{\text{城镇}} + k_{\text{道路}} = 1$ 。假定“草地”类型的土地面积占比增大 10 个百分点后,“城镇”用地面积占比相应减少 10 个百分点,其他用地类型面积保持不变。通过对建成区采取低影响开发(增大草地面积)后,区域内相应的产流量 $R_{\text{草地}}$ 升高, $R_{\text{城镇}}$ 下降。

假设草地面积为 $S_{\text{草}}$,建设用地面积为 $S_{\text{建}}$,则透水性较高的草地面积增加 $X\%$,等同于通过低影响开发后将不透水的硬化面积(城镇用地)转化为透水性较高的草地(低影响设施),则研究区域 CN 值的变化可用下式表达:

$$\Delta CN = [S_{\text{草}}(1+X\%) \times CN_{\text{草}} + (S_{\text{建}} - S_{\text{草}} \times X\%) \times CN_{\text{建}} - S_{\text{草}} \times CN_{\text{草}} - S_{\text{建}} \times CN_{\text{建}}] / (S_{\text{草}} + S_{\text{建}}) = S_{\text{草}} \times X\% (CN_{\text{草}} - CN_{\text{建}}) / (S_{\text{草}} + S_{\text{建}}) \quad (1)$$

那么,由于 CN 值变化引起 SCS 模型中流域可能的最大滞留量 S 的变化如下:

$$\Delta S = S_{\text{后}} - S_{\text{前}} = 25400 [1 / (CN_{\text{本}} + \Delta CN) - 1 / CN_{\text{本}}] = 25400 \{ (S_{\text{草}} + S_{\text{建}}) / [CN_{\text{本}} (S_{\text{草}} + S_{\text{建}}) + S_{\text{草}} \times X\% (CN_{\text{草}} - CN_{\text{建}})] - 1 / CN_{\text{本}} \} \quad (2)$$

由此建立起低影响开发量与雨水最大滞留量的数学模型关系,通过增加一定区域内低影响开发面积,使其 CN 值相应减小,雨水最大滞留量 S 同步增加,与低影响开发面积呈现出正相关性。

1.2 低影响开发对城市内涝的影响

① 土地利用分类

以 T 湖流域为例进行分析。根据降雨强度过程线,对降雨强度在时间上进行积分,得到不同降雨重现期内一次降雨过程的累计降雨量。为得到 T 湖流域内不同下垫面情况下的地物分布,采用遥感影像处理软件 ENVI 对不同下垫面进行分类,参考地物影像及实际地物,流域内的土地利用类型被分为林地、草地、水体、城镇、道路、工矿用地等六类,具体分类结果见图 1。

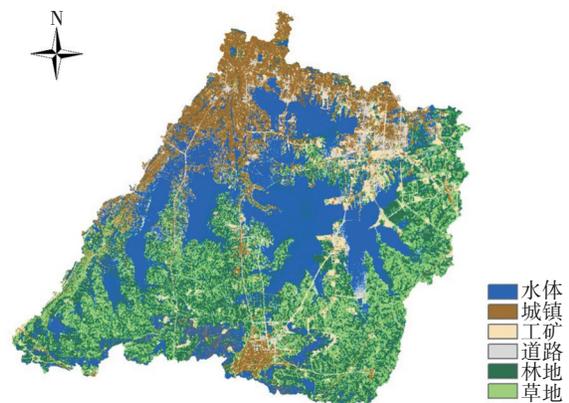


图 1 T 湖流域用地分类

Fig.1 Land classification of T Lake basin

由图 1 可知,T 湖流域内湖泊多、水域分布密度大,水体面积约占流域总面积的 1/3。草地及林地等绿色植被也比较密集,主要分布于流域的南部,开发强度小;建设用地主要分布于北部,工矿用地主要分布于东北部。假设采用低影响开发后,建设用地范围内“草地”用地面积比例提高 10 个百分点,“城镇”用地面积减少 10 个百分点,统计各类型土地对应的面积,如表 1 所示。

表 1 低影响开发前、后不同土地利用类型面积统计

Tab.1 Area statistics of different land use types before and after low impact development

项目	LID 前		LID 后	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
工矿用地	14.7	3.2	14.7	3.2
林地	118.9	26	118.9	26
草地	71.3	15.6	117.07	25.6(↑10个百分点)
水体	121	26.4	121	26.4
城镇用地	88	19.2	42.23	9.2(↓10个百分点)
道路	43.8	9.6	43.8	9.6

② 低影响开发前后的径流量对比

由 SCS 产流模型的计算公式可知,为求出流域可能的最大滞留量,需确定不同土地利用类型的 CN 值,分析对比研究区的土壤类型等资料,选取的土壤水文组为 B 组,分别计算出六种不同利用类型土地的可能最大滞留量 S ,具体计算数据见表 2。根据计算结果可知,下垫面裸露面积越多,可能最大滞留水量越大,工矿用地的可能最大滞留水量最多,超过 300 mm;湖泊是天然的蓄水体,可能最大滞留水量最小,不超过 10 mm;其次是道路和城镇用地,可能最大滞留水量均不超过 100 mm。

表 2 不同土地类型的可能最大滞留水量

Tab.2 Possible maximum water retention of different land types

项 目	工矿用地	林地	草地	水体	城镇用地	道路
CN 值	43	55	58	98	81	85
S/mm	336.7	207.82	183.93	5.18	59.58	44.82

根据流域可能最大滞留水量和 SCS 产流模型的计算公式,可得出 T 湖流域内低影响开发前后不同降雨重现期的降雨量和径流量,计算结果如表 3 所示。

表 3 低影响开发前后不同降雨重现期的降雨径流模拟结果

Tab.3 Rainfall runoff simulation results of different rainfall return periods before and after low impact development

降雨重现期	降雨量/ mm	雨峰/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	LID 前 径流量/ 10^4 m^3	LID 后径 流量/ 10^4 m^3	LID 前后 径流量 变化/%
5 年一遇	72	3.64	4 268.3	4 008.0	6.10 ↓
10 年一遇	103	4.76	5 891.2	5 582.8	5.24 ↓
20 年一遇	118	5.46	7 628.4	7 280.5	4.56 ↓
30 年一遇	127	5.87	8 599.9	8 233.8	4.26 ↓
50 年一遇	138	6.39	9 832.9	9 446.5	3.93 ↓

由表 3 可知,采用低影响开发后,区域内不同降雨重现期对应的径流量均有不同程度的降低,并随着重现期的延长,24 h 降雨量的增大,径流量减少幅度逐渐变小。

③ 低影响开发前后的内涝量变化

根据上述径流计算结果,进一步采用非线性水库法进行汇流计算,并综合城市内的湖泊与泵站抽

排能力,结合 GIS 技术,计算分析区域的内涝量。T 湖流域实际运行状况良好且有较大抽排量的泵站排水能力为 $142.5 \text{ m}^3/\text{s}$,整个流域内的集水区被视为无源淹没状况,综合局部等体积法的计算流程,可计算出低影响开发前后不同降雨重现期情形下的区域洪涝量,具体如表 4 所示。

表 4 低影响开发前后不同降雨重现期的洪涝量变化

Tab.4 Changes of flood volume in different rainfall return periods before and after low impact development

降雨重现期	LID 前 内涝量/ 10^4 m^3	LID 后 内涝量/ 10^4 m^3	LID 前后 内涝量变化/%
5 年一遇	3 037.09	2 776.75	8.57 ↓
10 年一遇	4 660.02	4 351.57	6.62 ↓
20 年一遇	6 397.18	6 049.32	5.44 ↓
30 年一遇	7 368.70	7 002.55	4.97 ↓
50 年一遇	8 601.72	8 215.29	4.49 ↓

由表 4 可以看出,采用低影响开发后,不同降雨重现期的 24 h 洪涝量均有不同程度的减少,随着降雨重现期的延长,区域洪涝量的减少幅度逐渐变小,即低影响开发对区域洪涝量的影响作用逐渐变小。

1.3 低影响开发与河湖联调协同模拟

低影响开发对于洪涝量的减少具有一定的控制作用,但随着降雨重现期的提高、降雨量的增加,低影响开发对径流量和洪涝量的影响效果逐渐变小,所以,利用城市大排水系统的调蓄优势,采用低影响开发与河湖水系协同防洪排涝,对于提高城市防洪排涝能力具有十分重要的意义。低影响开发与河湖水系协同防洪排涝模拟的技术路线见图 2。

由图 2 可知,在进行协同防洪排涝模拟时,将低影响开发模拟结果,即节点的径流过程作为河湖水系内涝模拟的输入,通过耦合水系的闸站模拟和优化调度模型,输出得到闸站的开度过程线和泵站开启指令等信息,可为城市排水防涝提供决策支持。

其中,水系排涝计算基于水系、渠道、泵站、闸门、对象拓扑关系等基本资料建模,通过耦合河网水动力计算、闸门、泵站、水系计算方法模拟水系内的涝水在不同闸门开度组合情况下的演进过程,优化调度计算包括目标函数、约束条件及求解算法三部分,通过对比水系排涝计算得到目标函数值和惩罚函数值,按照求解算法的寻优策略计算得出最优的闸站开度组合过程。

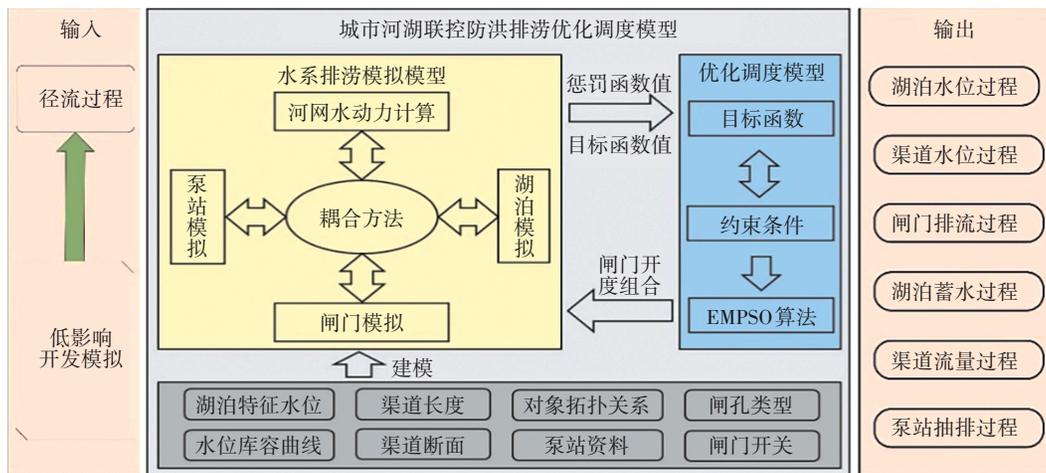


图 2 低影响开发与河湖水系协同模拟的技术路线

Fig.2 Technical route of LID and river-lake water system collaborative simulation

2 应用验证

2.1 低影响开发与河湖联调方案

以杭州市滨江新区为例,对整个研究区域的现状管网排水能力进行分析。

在部分管段不满足排水设计能力的基础上,采

用三种方式构建水系联合调度系统,即增加低影响开发设施、在特定位置设置闸站2座、降低排灌泵站的开启水位(预先排水腾空调蓄空间),分析上述措施对排水防涝效果的影响^[9]。

低影响开发与河湖联控调度方案见表5。

表 5 低影响开发与河湖联控调度方案

Tab.5 LID and river-lake joint control dispatching scheme

项 目	调度方案描述
现状本底	河道初始水位为 4 m; 华家排灌站开泵水位 4.5 m, 关泵水位 4 m, 排涝流量 40 m ³ /s; 浦沿排灌站开泵水位 4.5 m, 关泵水位 4 m, 排涝流量 22.5 m ³ /s
现状本底+LID 设施	河道初始水位为 4 m; 华家排灌站开泵水位 4.5 m, 关泵水位 4 m, 排涝流量 40 m ³ /s; 浦沿排灌站开泵水位 4.5 m, 关泵水位 4 m, 排涝流量 22.5 m ³ /s, 根据设计的径流总量控制率增加 LID 设施的调蓄容积
现状本底+LID 设施+泵站	根据设计的径流总量控制率增加 LID 设施的调蓄容积, 排灌站的开启水位降低, 排涝流量增大
现状本底+LID 设施+闸站	根据设计的径流总量控制率增加 LID 设施的调蓄容积, 在龙塘河与许家河交叉口位置设置闸站; 在小砾山输水河与白马湖的交叉口位置设置闸站
现状本底+LID 设施+泵站+闸站	根据设计的径流总量控制率增加 LID 设施的调蓄容积, 在龙塘河与许家河交叉口位置设置闸站; 在小砾山输水河与白马湖的交叉口位置设置闸站; 排灌站的开启水位降低, 排涝流量增大

基于上述四种调度方案,即现状本底条件下 LID 设施、LID 设施+泵站开启水位降低、LID 设施+闸站调度、LID 设施+泵站开启水位降低+闸站调度方案,分别计算研究区域的内涝面积和径流量,并与本底条件进行对比进而分析不同调度方案的防涝效果。

2.2 降雨情景分析

在构建并根据实测数据率定后的模型基础上,模拟分析不同重现期降雨场景,以验证城市低影响开发与水系联调的城市排水防涝方法。选取 2015 年 8 月 20 日的一场真实降雨以及 10 年一遇 2 h 降雨两种场景对应的分析结果进行展示。其中真实降

雨过程曲线见图 3,总降雨量 68 mm,强度相当于 5 年一遇降雨。

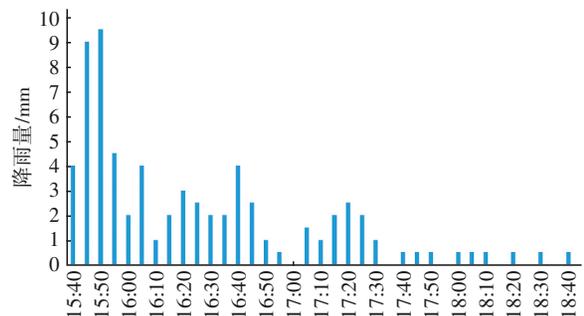


图 3 典型降雨过程

Fig.3 Typical rainfall process

① 场地积水内涝

在上述典型降雨场景下,经过四种方式的调度,内涝面积分别降低 28.79%、37.68%、38.62%、42.23%(见表6),溢流量分别减少 17.27%、34.42%、33.40%、42.82%(见表7)。可见,上述四种调度方案下内涝面积和溢流量都显著降低,其中 LID 设施+泵站+闸站调度方案内涝面积和溢流量降低比例最大,调度效果最优。

表 6 不同调控方案下的内涝面积变化

Tab.6 Waterlogging area change under different regulation schemes %

项 目	内涝面积降低比例			
	西部分区	中部分区	东部分区	合计
LID 设施	27.48	29.03	28.15	28.79
LID 设施+泵站	62.01	30.65	35.99	37.68
LID 设施+闸站	33.91	32.33	98.34	38.62
LID 设施+闸站+泵站	62.29	33.00	98.84	42.23

表 7 不同调控方案下的溢流量变化

Tab.7 Overflow change under different regulation schemes %

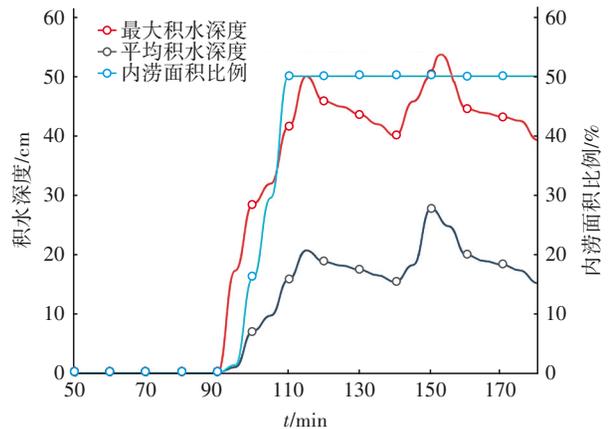
项 目	溢流量降低比例			
	西部分区	中部分区	东部分区	合计
LID 设施	14.65	17.73	16.38	17.27
LID 设施+泵站	57.79	30.17	43.28	34.42
LID 设施+闸站	19.10	23.43	98.70	33.40
LID 设施+闸站+泵站	60.75	30.76	99.15	42.82

② 道路积水内涝

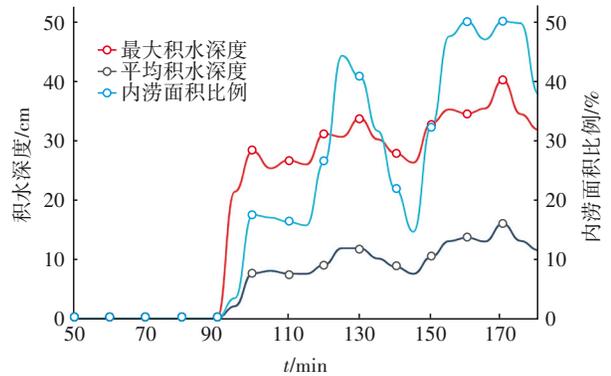
有无水系联调时典型道路内涝状态模拟见图4。

在无水系联调的情况下,研究区域内主干道路大部分积水深度在 15 cm 以下,但是部分典型积水道路平均积水深度为 27.73 cm,最大积水深度可达 57.5 cm,内涝深度超过 30 cm 的时间共计 70 min,对交通、经济均可能造成严重影响。

经过水系联调后,典型积水道路内涝削减较为明显,降雨后管道雨水可及时入河,因此水系联调引起河道水位降低,管中雨水可更为顺畅地排出,部分路段最大积水深度为 40.13 cm,相比调度前削减 30.2%;最大平均积水深度为 15.98 cm,削减了 42.4%;积水超过 30 mm 的历时为 48 min,降低了 40%^[10]。由此可见,针对管道排水通畅的道路,通过河湖联调可有效降低内涝的深度和积水时间,削减积水面积。



a. 无水系联调



b. 有水系联调

图 4 有无水系联调时典型道路内涝状态模拟

Fig.4 Simulation of waterlogging state of typical roads with and without water system joint commissioning

3 结论

建立了低影响开发与内涝水平的关联模型,实现了低影响开发对城市内涝影响的量化分析,并构建了低影响开发与河湖水系耦合进行联合调控的决策支持方案,典型案例应用表明,低影响开发与水系联调可在一定程度上减缓城市内涝程度。

对于设计合理、排水通畅的管道,采用河湖联调可显著削减内涝。其作用体现在通过降低河道水位,打通市政雨水管网排放口与河道衔接处的排水环节,从而避免河水顶托、倒灌导致管道水溢流,引起内涝。其对内涝的缓解作用主要体现在积水深度的降低、积水时间的缩短和内涝面积的削减。

参考文献:

[1] FAN G D, LIN R S, WEI Z Q, et al. Effects of low impact development on the stormwater runoff and pollution control [J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150404.

- [2] HE L, LI S, CUI C H, *et al.* Runoff control simulation and comprehensive benefit evaluation of low-impact development strategies in a typical cold climate area [J]. *Environmental Research*, 2021, 206:112630.
- [3] 郑妍妍, 秦华鹏. 低影响开发设施组合的水文模拟及不确定性分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 114-121.
ZHENG Yanyan, QIN Huapeng. Hydrological modeling of low impact development combined facilities and its uncertainty analysis [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1):114-121(in Chinese).
- [4] 沈才华, 王浩越, 褚明生. 构建内涝势冲量的海绵城市内涝程度评价方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(3):193-200.
SHEN Caihua, WANG Haoyue, CHU Mingsheng. Construction of evaluation method of intrinsic degree of sponge city based on the momentum of waterlogging potential energy [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(3):193-200(in Chinese).
- [5] 丁相毅, 刘家宏, 杨志勇, 等. 基于生态海绵流域视角的河湖联控方案研究——以湖南省凤凰县为例[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(9):35-40, 103.
DING Xiangyi, LIU Jiahong, YANG Zhiyong, *et al.* Viewpoint of eco-sponge watershed based-study on river-lake system joint-control scheme—a case study of Fenghuang County in Hunan Province [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(9): 35-40, 103(in Chinese).
- [6] 唐磊, 周飞祥, 王巍巍, 等. 北方城市典型内涝积水问题的系统化解决方案[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(13):139-144.
TANG Lei, ZHOU Feixiang, WANG Weiwei, *et al.* Systematic solution to typical waterlogging problems in northern cities [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(13):139-144(in Chinese).
- [7] 刘广奇. 城市绿地空间布局的海绵效应研究[J]. *给水排水*, 2019, 45(增刊):31-34.
LIU Guangqi. Study on sponge effect of urban green space layout [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(S1):31-34(in Chinese).
- [8] 陈思, 杨胜梅, 马琨. 基于SCS和GIS的不同降雨情景城市内涝过程模拟方法[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(11):16-20.
CHEN Si, YANG Shengmei, MA Kun. Simulation of rainstorm waterlogging process in urban areas based on soil conservation service model and geographic information system [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(11): 16-20(in Chinese).
- [9] 刘广奇, 桂发二, 宁存鑫. 基于低影响排水与河湖联控的排水防涝系统平台研究[J]. *建设科技*, 2019(18):65-68.
LIU Guangqi, GUI Fa'er, NING Cunxin. Research on drainage and waterlogging control system platform based on low impact drainage and river-lake joint control [J]. *Construction Science and Technology*, 2019(18):65-68(in Chinese).
- [10] 桂发二, 刘慧霞, 方纬. 基于城市低影响排水与河湖联控的排涝调度——以杭州市滨江区西南片区为例[J]. *建设科技*, 2019(20):75-79.
GUI Fa'er, LIU Huixia, FANG Wei. Drainage dispatching based on urban low impact drainage and river-lake joint control—taking southwest Binjiang District of Hangzhou as an example [J]. *Construction Science and Technology*, 2019(20): 75-79(in Chinese).

作者简介:刘广奇(1980-),男,山东寿光人,硕士,教授级高工,主要从事城镇水务、海绵城市、内涝治理等规划设计与研究工作。

E-mail:12098640@qq.com

收稿日期:2022-04-29

修回日期:2020-05-06

(编辑:丁彩娟)